



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Ingo Konts

**TALLINNA PAEPARGI RIPPSILLA DEFORMATSIOONIDE
MÕÕTMINE**

DEFORMATION MEASUREMENTS OF THE SUSPENSION
BRIDGE OF PAEPARK, TALLINN

Bakalaureusetöö
Geodeesia ja maakorralduse õppekava

Juhendaja: lektor Tarmo Kall, PhD

Tartu 2018

Eesti Maaülikool		Bakalaureusetöö	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		lühikokkuvõte	
Autor: Ingo Konts		Õppekava: Geodeesia ja maakorraldus	
Pealkiri: Tallinna Paepargi ripp silla deformatsioonide mõõtmine			
Lehekülgi: 32	Jooniseid: 15	Tabeleid: 2	Lisasid: 6
Osakond: Geomaatika osakond			
Uurimisvaldkond: Geodeesia			
CERCS-i kood: P515			
Juhendaja: lektor Tarmo Kall, Phd			
Kaitsmiskoht ja aasta: Tartu, 2018			
<p>Töös uuriti Tallinna Paepargi jalakäijate silla kandevasade deformatsiooni. Võrreldi nii rajatise plaanilisi koordinaate kui ka kõrgust. Saadud tulemusi võrreldi varasemate olemasolevate teostusjoonistega. Mõõdistusvahendiks valiti robottahhümeetri, sest võrreldi koordinaate X, Y, H. Sillale ei rajatud vajumisreepereid. Võrdlemiseks pidi otsima kohad, mille asukoht on selgesti arusaadav. Nendeks valiti betooninurgad ja betooni sisse valatud raudtalade nurgad. Tahhümeetriga mõõdeti poolvõttega, kuna teostus oli sama moodi teostatud tahhümeetriliselt ja poolvõttega. Tulemustes avastati ühe betooni valatud raudtala plaanilist liikumist ühes suunas 11 mm. Kõrguslikult erines nurk varasema mõõdistusega 1 mm. Samuti tuvastati esimese telje betoonrajatise kõrguslik vajumine 5 mm ulatuses. Rajatise vajumist saab teha ka siis, kui pole rajatud vajumisreepereid. Kindlama tulemuse ja võrdluse aga saaks, kui need oleks olemas. Need on kindlad kohad, mida koordineeritakse ka täpsemalt.</p>			
Märksõnad: ripp sild, robottahhümeeter, deformatsioon, mõõtmine			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Bachelor's Thesis	
Author: Ingo Konts		Steciality: Geodesy and Land Management	
Title: Deformation measurements of the suspension bridge of Paepark, Tallinn			
Pages: 32	Figures: 15	Tables: 2	Appendixes: 6
Department: Geomatics Field of research: Geodesy CERCS-i kood: P515 Supervisor: Tarmo Kall, PhD Place and date: Tartu, 2018			
<p>The study deals with the deformation of the loadbearing parts of the pedestrian bridge in Paepark, Tallinn. I compared the rectangular coordinates and the height of the structure. The results obtained were compared with previous existing as-built drawings. For measurement, I chose a robotic tacheometer, as I was going to compare the coordinates X, Y and H. No settlement marks had been established on the bridge. For comparison purposes, I needed to find points with clearly identifiable position. I chose corners of concrete and of steel beams buried in concrete as such points. I used the tacheometer for Face 1 measurements, as the building process was also performed using tacheometrical Face 1 measurements. Round measurements would not have added significantly to the accuracy in this study. From the results, I discovered a planar shift of one steel beam buried in concrete by 11 millimeters in one direction. The height difference of the corner as compared with the past measurements was 1 mm. Additionally, I detected vertical subsidence of the first axis of the concrete structure within the range of 5 mm. The subsidence of the structure can be determined even in the absence of settlement marks. However, the presence thereof would ensure more accurate results and comparisons. These are specific points, for which more accurate coordinates are found.</p>			
Keywords: suspension bridge, robotic total station, deformation, measuring			

SISUKORD

SISSEJUHATUS	5
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE.....	7
1.1. Deformatsioonide mõõtmiste ettevalmistus.....	7
1.2. Meetodid sildade deformatsioonide uurimiseks	7
2. MÕÕTMISEKS KASUTATAV INSTRUMENT JA METOODIKA.....	10
2.1. Kasutatud instrument	10
2.2. Kasutatud prisma	11
2.3. Kasutatud väliarvuti	12
2.4. Metoodika	13
3. MÕÕTMISTULEMUSED	18
4. MÕÕDISTUSANDMETE ANALÜÜS	21
KOKKUVÕTE	24
KASUTATUD KIRJANDUS	25
LISAD	26
Lisa 1. Trimble 5605 DR 200+ spetsifikatsioonid	27
Lisa 2. Esimese telje betoonrajatise teostusjoonis.....	28
Lisa 3. Teise telje betoonrajatise teostusjoonis	29
Lisa 4. Vantide teostusjoonis.....	30
Lisa 5. Vaba jaamaga tahhümeetri orienteerimise raport	31
Lisa 6. Silla rippuva osa teostusjoonis	32

SISSEJUHATUS

Bakalaureusetöö objektiks valiti Tallinnas Lasnamäel asuv Paepargi jalakäijate sild. Silla märkis töö autor ise, samuti tehti ka teostusmöödistused ise. Sild valmis 2013. aasta augustikuus. Huvitav oli teada saada, kas sellele saab teostada deformatsioonide uurimist. Iga silla seisukorda peab saama uurida, et teada saada, kas rajatis on ohutu. Kuna rajatisele polnud paigaldatud vajumisreepereid, valiti vaatluseks kindlad punktid, enamasti betooninurgad. Töö eesmärk oli vaadelda, kas sild on aja jooksul deformeerunud. Möödistuse tulemusi analüüsid eesmärk täideti.

Möödistustööd teostati robottahhümeetriga Trimble 5605 DR 200+. Kasutati veel Trimble TSC2 väliarvutit ja programmi Survey Controller 12.50 ning ehitusprismat Trimble Remote Target 602. Möödistus seoti olemasolevate käigupunktidega, mille pealt on varasem teostusjoonis tehtud. Sellega välistati uuest sidumisest tekkivad koordinaatide erinevused. Uuritavat nurka mõõdeti ühest seisust. Orienteeriti vaba jaama meetodiga, sest otse punktilt punktile ei saanud mõõta, kuna põõsad on ette kasvanud. Möödistati poolvõttega, sest varasemad andmed on mõõdetud samuti poolvõttega. Vaadeldavad punktid olid maksimaalselt 25 m raadiuses.

Möödistustulemused salvestati Survey Controllerisse. Sealt saadi csv ja html fail. Csv faili saab sisestada Autocad programmi ning võrrelda tulemusi varasemate andmetega. Html fail on möödistusaruande fail, kus on ära märgitud möödistuse aeg, temperatuur, õhurõhk, möödistuskäigu arvutus jne.

Töö on üles ehitatud neljaks peatükiks. Esimeses kirjeldatakse erinevaid võimalusi deformatsioonide uurimisel. Varasemalt on uuritud deformatsioone nii geomeetrilise nivelleerimisega, GNSS tehnoloogia abil kui ka fotogramm-meetrilise möödistusega. Tehtud on katseid, kus silla mõõtmisel on võrreldud tahhümeetri ja GNSS mõõtja omavahelist mõõtmistäpsust ja kiirust. Robottahhümeetriga on tehtud tammi monitooringut. Teises peatükis kirjeldatakse mõõtmisel kasutatavaid seadmeid ja nende täpsust. Kirjeldati ka metoodikat, kuidas mõõtmine toimub.

Kolmandas peatükis näidatakse saadud tulemusi. Need esitatakse 2D-plaanil, kus on näidatud varasema möödistuse erinevused. Erinevused kujutati hälbe suuruse ja suuna näitamisega. Koostati ka tabel, kus saab võrrelda koordinaatide erinevust. Neljandas

peatükis analüüsi andmeid. Põhjendatakse, millest võivad olla tingitud vead. Selgitati välja, kas sild on deformeerunud või mitte.

Töö autor avaldab tänu oma juhendajale Tarmo Kallile.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1. Deformatsioonide mõõtmiste ettevalmistus

Sildade käitumist erinevates oludes saab mõõta eri mõõteriistadega. Enim on levinud geodeetilised mõõteriistad: nivelliir, elektrontahhümeeter ja RTK GNSS seade (Cosser, E., Roberts, G. W., Meng, X., Hodson, A. H. 2003., Handayani, H. H., Yuwono, Taufik. M. 2015., Liptak, M. 2011., Liptak, I 2013). On kasutatud ka kiirendusmõõturit (Liptak, I. 2013) ja ka lähivaate fotogramm-meetriat (Close Range Photogrammetry) (Handayani, H. H., Yuwono, Taufik. M. 2015). Kuid alati kasutatakse nendega koos ka mingit geodeetilist instrumenti, kas siis GNSS vastuvõtjat või elektrontahhümeetrit. Neid on vaja sellepärast, et siduda andmed plaanilise ja kõrgusliku võrguga. Lisainformatsiooni saamiseks on kasutatud sildade liikumise jälgimiseks meteoroloogijaama (Liptak, M. 2011).

Enne silla mõõtmist tuleb teha vastavalt töö eesmärgile erinevaid ettevalmistusi. Rajada kindelpunktid, mille pealt saab teha mõõtmisi. Uuritavate objektide külge tuleb kinnitada prismad, et saaks elektrontahhümeetriga neid punkte jälgida, kui tuleb teha pikema aja jooksul mõõtmisi [8]. Kui kasutada GNSS vastuvõtjat, siis tuleb kinnitada see uuritava sillaelemendi külge [7]. Kui töös kasutada erinevaid lisaseadmeid, tuleb ka need sillale kinnitada. Vaja läheb kindlasti arvutit ja programme, millega andmeid töödelda, võrrelda või analüüsida.

1.2. Meetodid sildade deformatsioonide uurimiseks

Mõõtmist saab reguleerida kohapeal või jälgida protsessi kontorist. Mõõteriist seadistatakse iga teatud aja tagant salvestama saadud infot sillale kinnitatud prismadelt või antennidelt. Informatsioon edastatakse arvutisse. Pikema vahemaa korral kasutatakse objektile rajatud interneti antenni, mille kaudu andmed arvutisse saata. Tulemusena saadakse mõõdistusandmete kogum. Informatsiooni mitmekesisus sõltub sellest, milliseid lisaseadmeid koos GNSS vastuvõtja või elektrontahhümeetri kõrval samaaegselt kasutada. [9].

GNSS vastuvõtjat ja robot elektrontahhümeetrit on omavahel võrreldud silla uuringute tegemisel. Uuritud on erinevate instrumentide andmeedastuskiirust mõõtmisel, ning kuidas see avaldub mõõtmistulemustes. Kasutati Leica system 500 GNSS antenni, Leica TCA robot elektrontahhümeetrit ja 360° prismat. Tahhümeeter sünkrooniti Geocom programmiga, mis

võimaldas kogu seadmest tulevat infot salvestada sülearvutisse. Kõigepealt tehti katse, kus prisma kinnitati metronoomi külge. Aparaat oli 14 meetri kaugusel prismast. Metronoom võnkus edasi-tagasi paremalt vasakule 120, 100, 80, 60 ja 50 lööki minutis. See teeb vastavalt 60, 50, 40, 30 ja 25 võnget minutis (2 lööki ühes võnkes). Mõõtmistulemused näitasid seda, et tahhümeeter suutis salvestada tulemusi kuni 1Hz võngete korral, kiiremate võngete korral jäid tulemused kesiseks, sest instrument ei suutnud kogu infot salvestada.

Teises katses võrreldi sama tahhümeetrit ja GNSS vastuvõtjat sillal. Katses kasutati 360° prismat, tahhümeetriga mõõtmisel. GNSS vastuvõtja ja prisma kinnitati silla käsipuu külge ühele kõrgusele kõrvuti.

Mõõtmistulemused näitasid, et tahhümeeter ei suutnud anda sama tulemust, mis GNSS vastuvõtja. GNSS vastuvõtja suudab salvestada infot kuni 10Hz. Seega saab robot elektrontahhümeetrit kasutada pigem *Stop and Go* olukordades, kuid pideval kiirel liikumisel jäävad mõõtmisandmed puudulikuks. [7]

Praeguseks on olemas juba uuemad robot-tahhümeetrid, mille mõõtmiskiiruseks 26,6 kHz (Trimble SX10).

Silla uuringut on tehtud ka kasutades ainult elektrontahhümeetrit. Mõõdetud on silda erinevatel aegadel ning uuritud koormuse mõju sillale erineval kellaajal. Kasutati Leica TS30 robot tahhümeetrit, meteoroloogiajaama (Reinhardt DFT-1), kaldeandurit Leica Nivel 210, programmi Leica Geomos 5.0, GNSS kohaliku aja serverit, Wifi-ruuterit ja arvutit. Instrumendi orienteerimiseks rajati neli jaama, mille abil kontrollida tahhümeetrit. Vaadeldavatesse punktidesse kinnitati prismad – viiele sambale, igaühele kaks prismat ning üks võlvi külge silla kõrgemasse punkti.

3D-punktid salvestati iga 10 minuti tagant ning kogu katse jooksul mõõdeti 146 epohhi. Meteoroloogiajaam mõõtis ilmaolusid iga 10 sekundi tagant.

Andmete analüüs näitas temperatuuri muutust ajas silla sammaste juures. Näha saab koordinaatide erinevusi aja jooksul erinevates mõõdistuspunktides. Andmete põhjal tehti regressioonanalüüs, kus on näha standardhälve, mood, mudeli kirjeldatusse aste jms. Tulemustest oli näha, et kõige suurem muutus sillal toimus hommikul kella 9 ajal. Sellest võib järeldada, et silla koormus on tingitud tihedast hommikusest liiklusest. [8].

Tahhümeetriga saab jälgida mingi ajaperioodi jooksul silla vajumist. On jälgitud ühte tammi Trimble S8-ga. Tahhümeeter kinnitatakse kindlale pinnale või kohta, kus kõrvalised isikud

sellele ligi ei pääse. Rajati kindlad punktid, millelt saab instrumendi orienteerida. Tammi kandevasadele kinnitati reflektorid. Tahhümeeter mõõdab etteantud aja jooksul kindlaid punkte ning saadab andmed internetiühenduse kaudu arvutisse. Suurematest hälvetest teavitab arvutiprogramm geodeeti või ehitajat meiliga, sõnumiga või siis veebilehel, kus peab eelnevalt kasutaja olema. [9]. Sellise meetodi puhul suudetakse kiiresti reageerida ning probleemid lahendada.

Silla mõõtmistel kasutatakse koos tahhümeetriga veel kiirendusmõõtjat. Sellega saab mõõta silla vibreerimist. Erineva raskuse all sild vibreerib eri sagedusel. Seega saab võrrelda tahhümeetri ja kiirendusmõõtja omavahelisi mõõtmisandmeid ning korrigeerida mõõtmistulemusi. [5].

Sildade vajumist on vaadeldud kasutades CRP tehnoloogiat (lähedalt tehtud fotogrammeetria). Selleks, et kasutada kaamerat vajumise vaatlusel, tuleb kaamera kõigepealt kalibreerida vastava skeemiga (maleruutudest koosnev skeem). Seejärel saab teha pilte erinevatel ajahetkedel ja neid pärast võrrelda, eemaldades enne projektsioonivead. [6].

2. MÕÕTMISEKS KASUTATAV INSTRUMENT JA METOODIKA

2.1. Kasutatud instrument

Töös kasutati robot eletrontahhümeetrit Trimble 5605 DR 200+. Instrument koosneb järgmistest osadest: toiteplokist; liikumissensorist (mille abil jälgitakse prisma liikumist ja otsimist); 2,4 GHz raadiost; raadioantennist; visuaalsest lasertäpist (pimedas viseerimiseks, mõõtmine sellega ei toimu) ja kaugusmõõtjast (laser mõõtjaga koos) (joonis 2.1).



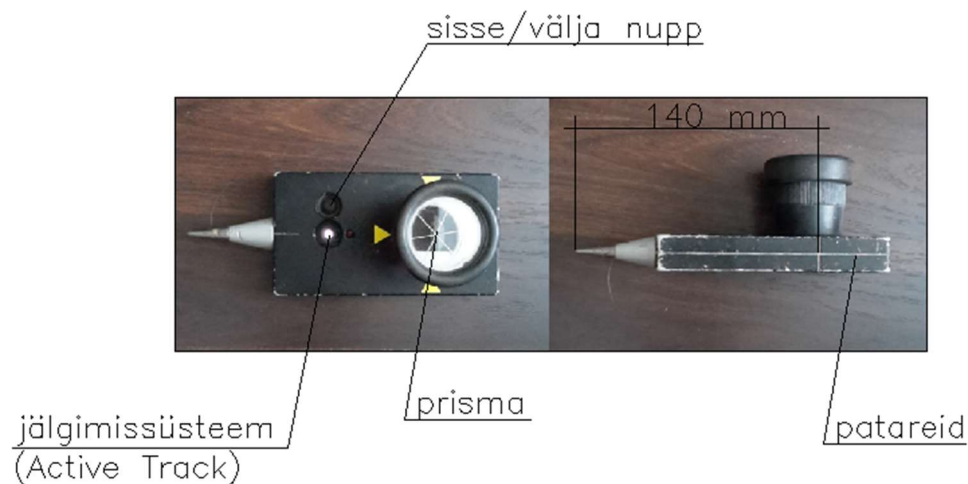
Joonis 2.1. Trimble 5605 DR 200+ peamised osad

Instrumendi kauguse mõõtmise täpsus prismaga standardrežiimis on $\pm 3 \text{ mm} + 3 \text{ ppm}$. See tähendab, et 5–200 m peale on kaugusmõõtmise viga $3 \text{ mm} + 3 \text{ mm}$ kilomeetrit. Kiirstandard mõõtmise režiimis on kauguse mõõtmise viga $8 \text{ mm} + 3 \text{ ppm}$ ning pideval mõõtmisel $10 \text{ mm} + 3 \text{ ppm}$. Vähim kaugus, mida saab mõõta, on 2 m.

Suuna mõõtmise standardhälve DIN 18723 järgi on 5" (1,5 mgon). See tähendab, et ca 100 m kohta kahe täisvõtte tegemisel tagab instrument 5" nurgamõõtmise täpsuse. See teeb 5 mm 100 m kohta. Poolvõtte korral on nurgaline viga ca 100 m kohta 10", mis teeb vastavalt kaugusele 10 mm. Instrumendi spetsifikatsioon on välja toodud lisas 1.

2.2. Kasutatud prisma

Robot tahhümeetri juurde kuuluvad ka teistsugused prisma. Kasutati Trimble RMT Remote Target 602 (joonis 2.2). Prisma töötab AA patareide pealt, sest selle sisse on ehitatud automaatne jälgimissüsteem (*Active Track*). See on vajalik, et instrument leiaks prisma üles ning suunaks täpselt selle reflektori keskele. Prisma konstant on 0.



Joonis 2.2. Mõõtmisel kasutatav prisma RTM602

Prisma on teraviku tipust kuni reflektori keskele 140 mm kõrge. Vesilood ja patareide sisestuskoht on prisma peal (joonis 2.3).



Joonis 2.3. Prisma pealt vaates. Vasakult esimene on vesilood, teine pikenduspulgad ja kolmas patareide pesa

Prisma kõrgus peab olema tööasendis võimalikult madal. Kõrge sauaga prisma liigub hoidmisel suurema amplituudiga ning on seepärast ebatäpsem. Seepärast kasutatakse ehituste nn ehitusprismasid, mis on võimalikult madalad.

2.3. Kasutatud väliarvuti

Mõõtmisel kasutati väliarvutit Trimble TSC2 (joonis 2.4). TSC2 koosneb sisseehitatud akust, klaviatuurist, ekraanist ja tarkvarast (Survey Controller v12.50).



Joonis 2.4. Väliarvuti Trimble TSC2

Väliarvutiga käib kaasa raadio, et instrumendiga ühendus oleks. Raadio on sama sagedusega nagu robot tahhümeeter 2,4 GHz (joonis 2.5). TSC2 võimaldab kasutada sisseehitatud raadiot, aga see ei ühildu Trimble 5605 tahhümeetriga.



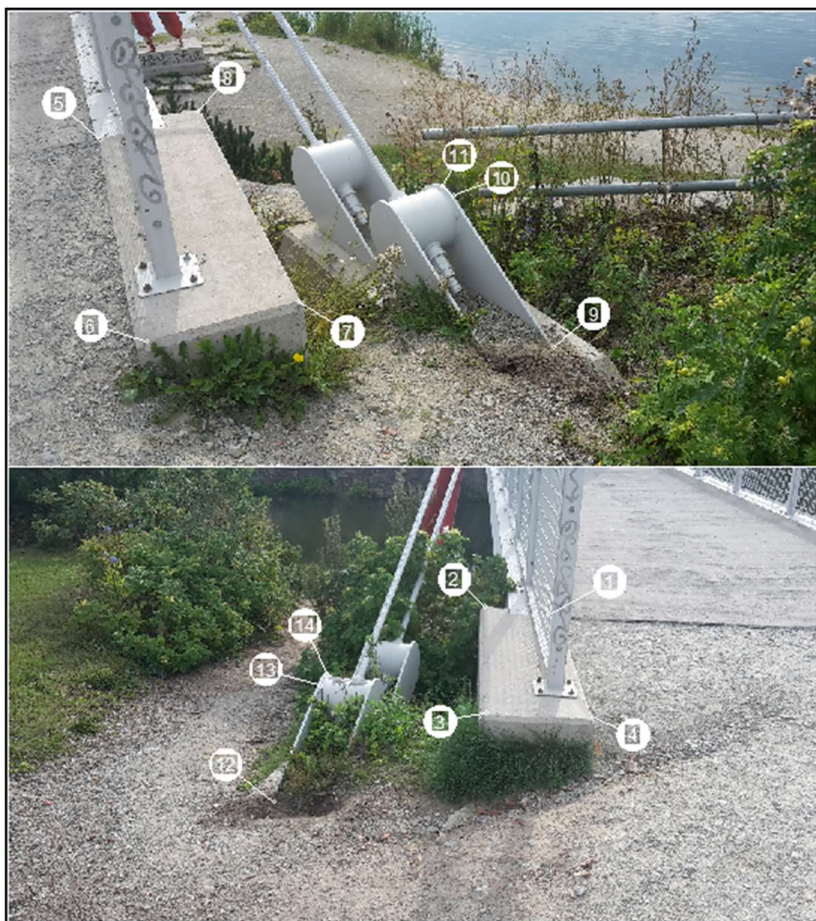
Joonis 2.5. Raadio väliarvutile TSC2

2.4. Metoodika

Silla deformatsioonide määramiseks valiti tahhümeetiline meetod, sest varasemates sarnastes töodes on sildade uurimisel kasutatud tahhümeetrit. Lisaks kõrguse muutuse jälgimisele, sooviti vaadelda ka X, Y koordinaatide muutust.

Enne mõõdistusi tehti ettevalmistustöid. Kontrolliti instrumendi alloleva treegeri vesiloe korrasolekut. Seejärel pandi treeger statiivi peale ning orienteeriti see maha märgitud punktile. Kui seade oli loodis, asetati sellele tahhümeeter. Seejärel käivitati instrument ning seati aparaat tema enda sisemise loodi järgi paika. Siis vaadati treegeril asuvat vesiloodi, mille mull oli keskele jäänud, seega on treegeri lood korras. Nüüd kontrolliti treegeri optilise niitristi korrasolekut. Joonistati pliiatsiga seadme kontuur statiivi alusele. Järgmisena kontrolliti kolmes asendis treegeri tsentreerimise niitristi. Kui vahetati treegeri asendit, siis pandi see loodi ning optiline niitrist jäi tsentreeritud punktile. Seega oli treeger töökorras ning seadmest tingitud vead välistatud.

Järgmisena uuriti sillale tehtud varasemaid teostusjooniseid. Kuna vajumisvaatlusteks paigaldatavad seinamärgid puudusid, valiti ise kindlad kohad, mille järgi võiks kontrollida silla deformatsiooni. Kuna tegu oli rippsillaga, sai valida ainult kandvaid osasid, sest rippuvad osad liiguvad tuule ja jalakäijate koormuse all. Sobisid esimese telje betoonrajatis (lisa 2), teise telje betoonrajatis, kuhu toetuvad silla püloonid (lisa 3) ja vandid ning nende betoonrajatis (lisa 4). Mõõdetud kohad on tähistatud järjekorranumbritega. Numbrid 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 on esimese telje betoonrajatis (joonis 2.6).



Joonis 2.6. Esimese telje betoonrajatis ja kontrollitavad punktid

Vandid, mida kontrolliti, on tähistatud numbritega 10, 11, 12, 13, 14 (joonis 2.6). Teise telje betoonrajatise kontrollitud kohad on 15, 16, 17 (joonis 2.7).



Joonis 2.7. Teise telje betoonrajatis ja kontrollitavad punktid

Pidi mõtlema, kuidas siduda mõõdistus geodeetilise põhivõrguga. Teostusjooniselt leiti käigupunktid, mille pealt on tehtud silla teostusmõõdistus ja märkimine ning otsiti need üles (joonis 2.8).



Joonis 2.8. Silla märkimisel ja teostusmõõdistamisel kasutatud käigupunktid

Joonisel 2.8 näidatud punkti G2 leiti kohe üles, kuna punkt oli rajatud paepaljandikule ja seda oli lihtne leida (joonis 2.9).

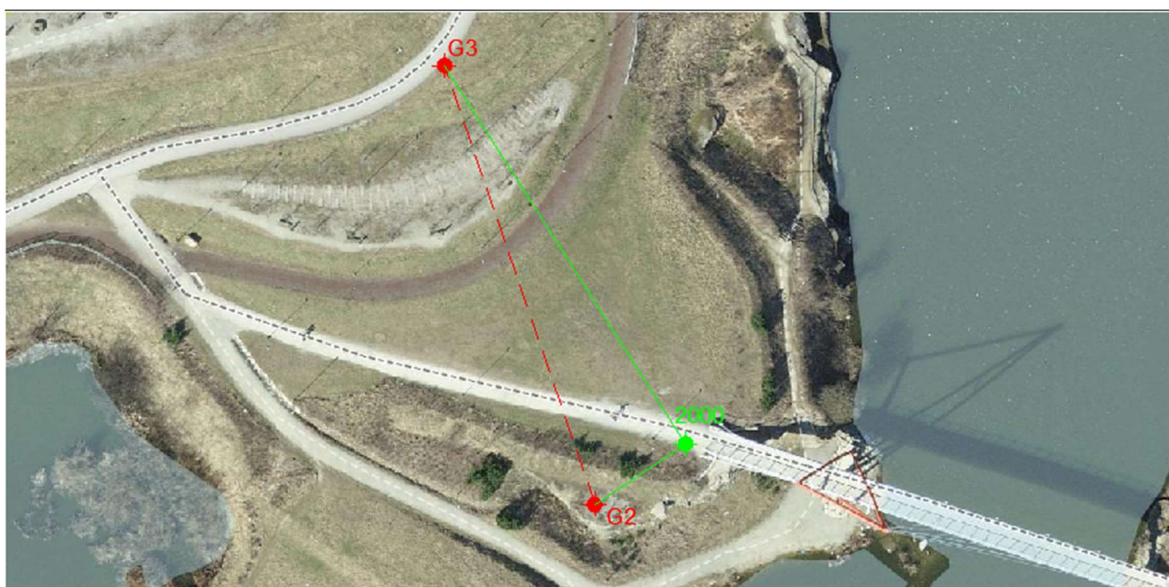


Joonis 2.9. Käigupunkt nr G2

Joonisel 2.8 kujutatud käigupunkti G3 otsimiseks kasutati GNSS tehnoloogia abi. Sisestati käigupunkti koordinaadid ning märgiti see uuesti välja, et punkti asukohta leida. Punkt oli olemas. Kõige kindlam on mõõta rajatist nende punktide pealt, millelt see on märgitud. Sellega väldib uuest käigust tingitud vead.

Aja möödudes oli punktide omavaheline nähtavus kadunud, seega pidi tegema orienteerimise vaba jaama meetodiga (*Survey Controlleris* nimega *Resection*) [1, p. 18]. Seisupunkt rajati nii, et sellest oleksid näha mõlemad tuntud punktid. Nendeks punktideks on nr G2 ja nr G3 (joonis 2.8). Tuntud punktide vahel arvutatakse geodeetiline vastulõige, mida saab teha 2–8 punkti vahel. Töö autoril oli võimalus teha seda kahe punkti vahel.

Valiti sobiv koht ning pandi statiivi püsti. Statiivile kinnitati instrument ning käivitati see. Seejärel võeti väliarvuti ja raadio ning ühendati need omavahel. Väliarvuti sisselülitamise järel tuleb ekraani ette instrumendi elektrooniline lood, mille abil saab vajadusel täpsustada instrumendi horisonteerimist. Seejärel toimub aparadi kompensatori initsialiseerimine. Peale seda tuleb sisestada ilmastiku parameetrid. Sisestati ainult õhutemperatuur, mida auto termomeeter sel hetkel näitas ning seejärel kuvati automaatselt teised näitajad. [2, 11.6.] Väliarvutis tehti uus töö ning sisestati kaks tuntud punkti, G2 ja G3 (joonis 2.10). koordinaadid [2, p. 11.7.].



Joonis 2.10. Tahhümeetri orienteerimise skeem

Valiti *Survey Controlleris* orienteerimisprogramm *Resection* [2, p. 11.9.1.]. Seal määrati seisupunkt, millel sel hetkel veel ei olnud koordinaate, punkti nr 2000 (joonis 2.10).

Järgmisena küsiti esimest tuntud punkti, milleks valiti nr G2 (toimus mõõtmise) ning seejärel teine tuntud punkt nr G3 (toimus mõõtmise). Peale mõõdistusi toimus arvutus ning kuvati orienteerimise jääkvead ΔX , ΔY ja ΔH (lisa 5). Nüüd sai hakata rajatise kindelpunkte mõõdistama, et välja selgitada, kas silla kandevosad on deformeerunud või mitte.

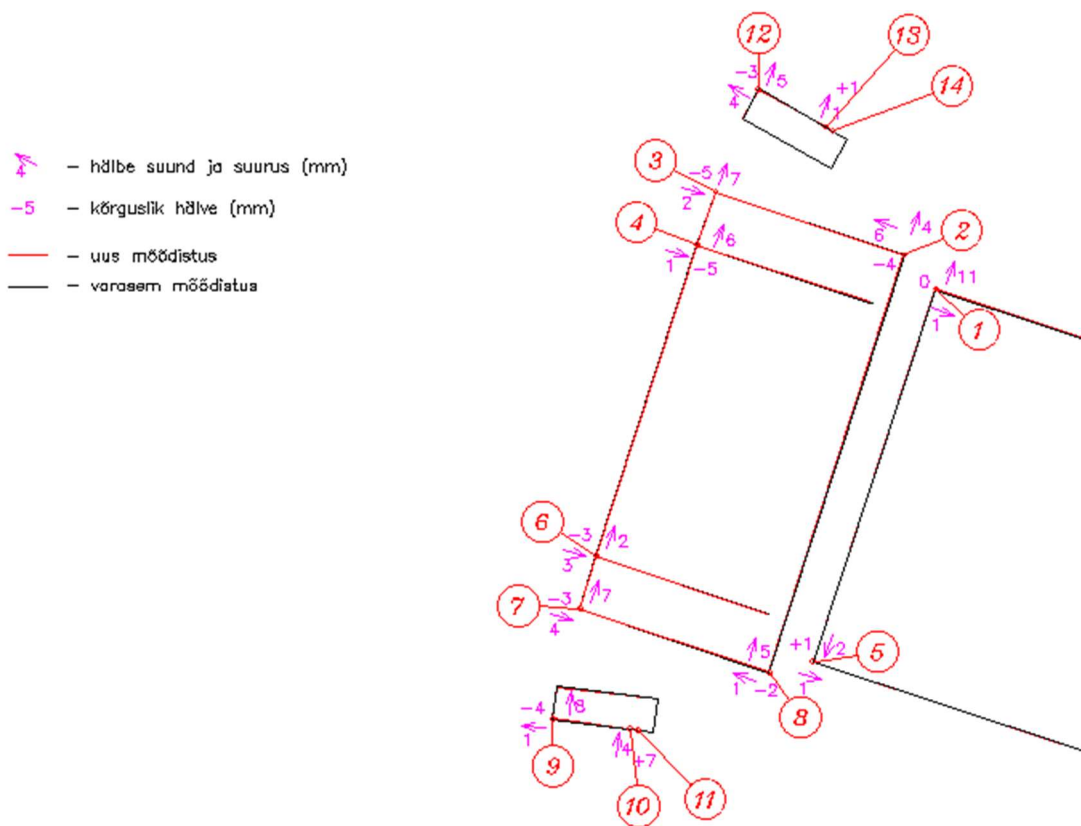
Huvi pärast mõõdeti üle ka rippuva silla raudkonstruktsioon. Ilm oli tuulevaikne, seega ei saanud sild väga kõikuda, et tulemust mõjutada. Rippuvale osale sai ainult mõju avaldada autori kehakaal sillal ja prisma loodis hoidmise täpsus. Väikse prismaga ei saanud mõõta, seda tehti suure prismaga, mille saua kõrgus maapinnast oli 1,7 m. Seega plaaniline kõrguse mõju võib olla suurem, sest varasem mõõdistus oli teostatud ehitusprismaga, mis on maapinnale lähemal ja käe kõikumisest tingitud vead väiksemad. (lisa 6). Ühe otsa mõõtmisel liikus sillale peale töö autori veel üks inimene, seega sai vaadata, kas ka see avaldas mingit mõju.

Orienteerimisel saab ka täpsust tõsta kasutades täisvõtteid [2, 11.9.1.], kuid silla andmed on saadud poolvõttega ning see ei annaks tulemustes olulist täpsuse tõusu. Mõõdistatavad punktid asuvad ca 25 m raadiuses. Kahe täisvõttega on nurgaline viga ca 100 m peale 5 mm, mis teeb poolvõttega sama maa peale 10 mm [3]. Kuna mõõdistuspunktid jäid 25 m ulatusse, siis teeb see poolvõttega nurgalist viga ca 2,5 mm. Lisaks tuleb arvestada, et varasemalt on mõõdistatud kahemehe tahhümeetriga, kus tuleb prismale käsitsi suunata, millest võib tekkida juba paar millimeetrit viga.

Eeldatavalt peaksid mõõdistustulemuste erinevused varasema mõõdistamisega jääma ca 7 mm piiresse, arvestades mõõdistustingimusi. Selles vahemikus ei saa rääkida rajatise olulisest vajumisest, sest tulemuse erinevus on tingitud kahest erinevast orienteerimisest, prismast, mõõdistaja prisma hoidmisest ning instrumendiga prismale suunamisest.

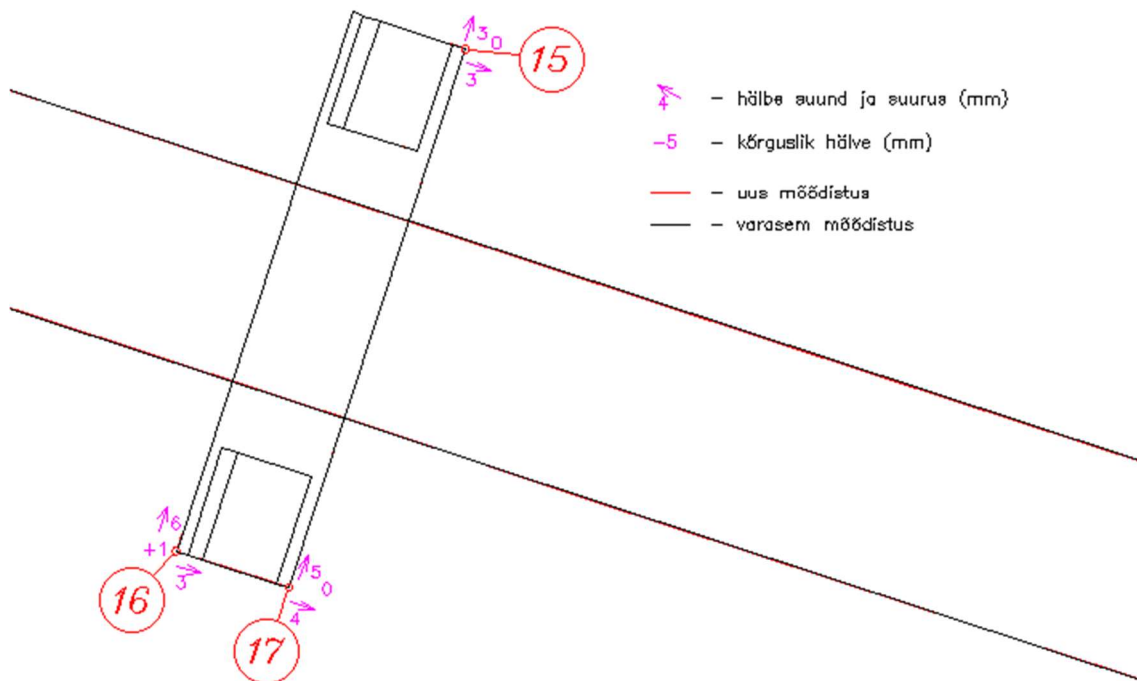
3. MÕÕTMISTULEMUSED

Väljas said mõõdetud silla punktid 1–17 (joonis 2.6 ja joonis 2.7). Erinevused varasemate mõõdistustulemustega väljendati pealt vaates plaaniliste koordinaatide hälbe suuruse ja suuna abi. Kõrguslik hälve näidati varasemast mõõdistusest, vastavalt kõrgema (+) või madalamana (-). Numeratsioon on sama, mis joonisel 2.7. Esimese telje betoonrajatise hälbed on näidatud joonisel 3.1. Teise telje betoonrajatise hälbed joonisel 3.2. ja rippuva osa raudkonstruktsiooni hälbed joonisel 3.3. Punktid 21, 22, 23, 24 mõõdeti siis, kui sillal kõndis ka jalakäija (joonis 3.3).

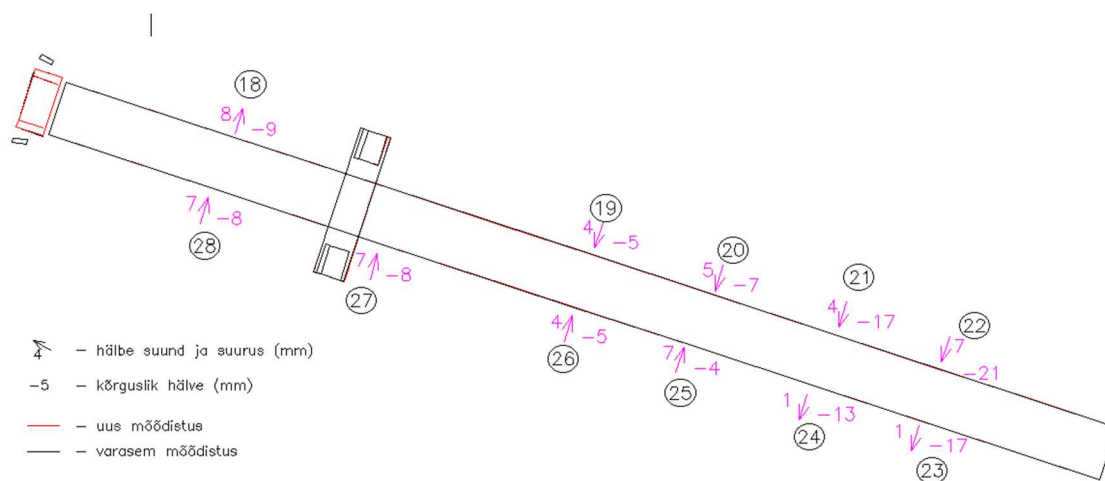


Joonis 3.1. Esimese telje betoonrajatise mõõdistamise tulemused

Joonisel 3.1. kujutatud punktides 10, 11, 13, 14 ei saanud täpset asukohta mõõta. Seal saab hälvet võrrelda ainult ühes suunas. Punktid on vandi käänupunktid, mille üheselt mõistetavat asukohta on raske määrata. Vandi lõige on näha lisas 4.



Joonis 3.2. Teise telje betoonrajatise mõõdistamise tulemused



Joonis 3.3. Rippuva osa mõõdistamise tulemused

Et deformatsioone vaadelda ka numbrilisel kujul ΔX , ΔY ja ΔH , koostati ka tabel. Esimese telje betoonrajatise koordinaadid ja deformatsioonid on tabelis 3.4. Teise telje koordinaatide ja deformatsioonide kohta on tabel 3.5.

Tabel 3.4. Esimese telje betoonrajatise koordinaatide ja hälvete tabel (m)

nr	Uus mõõdistus			nr	Olemasolevad andmed			Tulemused		
	X	Y	H		X	Y	H	ΔX	ΔY	ΔH
1	6588642,157	545617,088	41,569	1	6588642,147	545617,084	41,569	-0,01	-0,004	0
2	6588642,457	545616,802	41,579	2	6588642,451	545616,807	41,583	-0,006	0,005	0,004
3	6588643,015	545615,131	41,538	3	6588643,009	545615,126	41,543	-0,006	-0,005	0,005
4	6588642,546	545614,963	41,538	4	6588642,540	545614,960	41,543	-0,006	-0,003	0,005
5	6588638,836	545615,997	41,574	5	6588638,838	545615,997	41,573	0,002	0	-0,001
6	6588639,781	545614,063	41,541	6	6588639,780	545614,060	41,544	-0,001	-0,003	0,003
7	6588639,310	545613,919	41,544	7	6588639,304	545613,913	41,547	-0,006	-0,006	0,003
8	6588638,745	545615,603	41,587	8	6588638,740	545615,602	41,589	-0,005	-0,001	0,002
9	6588638,330	545613,676	40,995	9	6588638,322	545613,676	40,999	-0,008	0	0,004
12	6588643,932	545615,513	40,997	12	6588643,935	545615,519	41,000	0,003	0,006	0,003

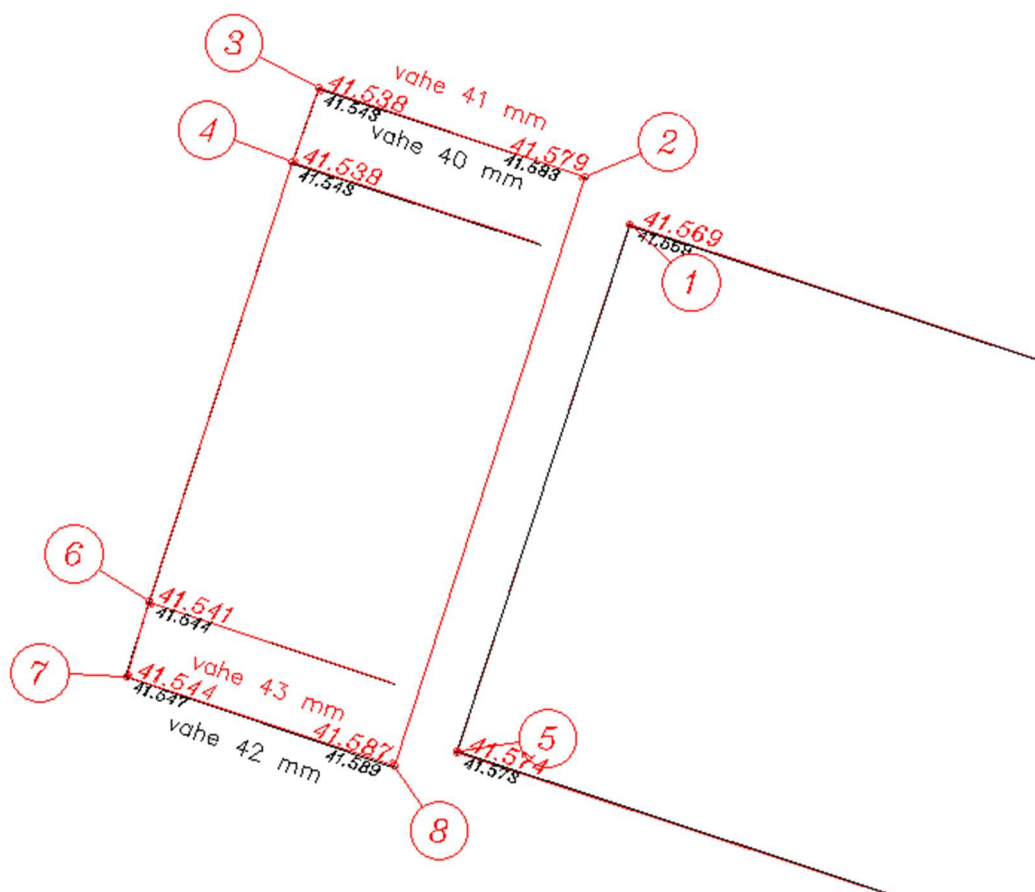
Tabel 3.5. Teise telje betoonrajatise koordinaatide ja hälvete tabel (m)

nr	Uus mõõdistus			nr	Olemasolevad andmed			Tulemused		
	X	Y	H		X	Y	H	ΔX	ΔY	ΔH
15	6588638,623	545637,610	36,308	15	6588638,621	545637,607	36,308	-0,002	-0,003	0,000
16	6588630,169	545632,741	36,310	16	6588630,164	545632,736	36,309	-0,005	-0,005	-0,001
17	6588629,560	545634,643	36,309	17	6588629,556	545634,638	36,309	-0,004	-0,005	0,000

4. MÕÕDISTUSANDMETE ANALÜÜS

Esimese telje betoonrajatise koordinaatide tabeli (tabel 3.4) järgi on näha, et erinevused uue ja varasema mõõdistuse vahel jäävad varasema prognoositud mõõdistustäpsuse piiridesse. Metoodika osas kirjeldatud mõõdistusviisi ja inimmõju arvestades võiks erinevus varasema ja praeguse mõõdistusega jääda ± 7 mm piiresse. Tabelit vaadates nii tuligi. Oli nii väiksemaid vigu kui ka suuremaid. Kõige väiksem hälve oli punktis 5 ($\Delta X = 2$ mm, $\Delta Y = 0$ mm, $\Delta H = 1$ mm) ja kõige suurem viga punktis 3 ($\Delta X = 6$ mm, $\Delta Y = 5$ mm, $\Delta H = 5$ mm).

Punktid 2, 3, 4, 6, 7, 8 moodustavad ühe tervikliku betoonrajatise, mis on valatud ühe betoonvaluga. Kõrgusliku erinevuse tekkimine on tingitud kahest erinevast mõõdistusest tingitud vigadest. Et aru saada, kas betoonrajatise nurkades on tekkinud vajumine, pidi jälgima nende nurkade omavahelist kõrguse suhet nii varasema kui ka praeguse mõõdistusega. Punkti 2 ja 3 varasema mõõdistuse kõrguse vahe oli 40 mm. Praeguste mõõdistuste 2. ja 3. kõrguste omavaheline erinevus 41 mm. Seega erinevus nurkade vahel on 1 mm ning nendes nurkades pole suurt muutust kõrguslikult toimunud. Sama võrdlus tehti teise nurgaga. Punktide 7 ja 8 omavaheline kõrguste erinevus varasema mõõdistusega oli 42 mm, uue mõõdistusega 43 mm. Vahe on 1 mm. Kui mingi nurk oleks vajunud, siis ei saaks kõrguste omavaheline suhe jääda samaks. (joonis 4.1). Vaadeldes joonist 3.1, on näha, et rajatis on vajunud ühtlaselt. Alumine ots 2–3 mm ja ülemine ots 4–5 mm. See vajumine pole ohtlik rajatise seisukorrale.

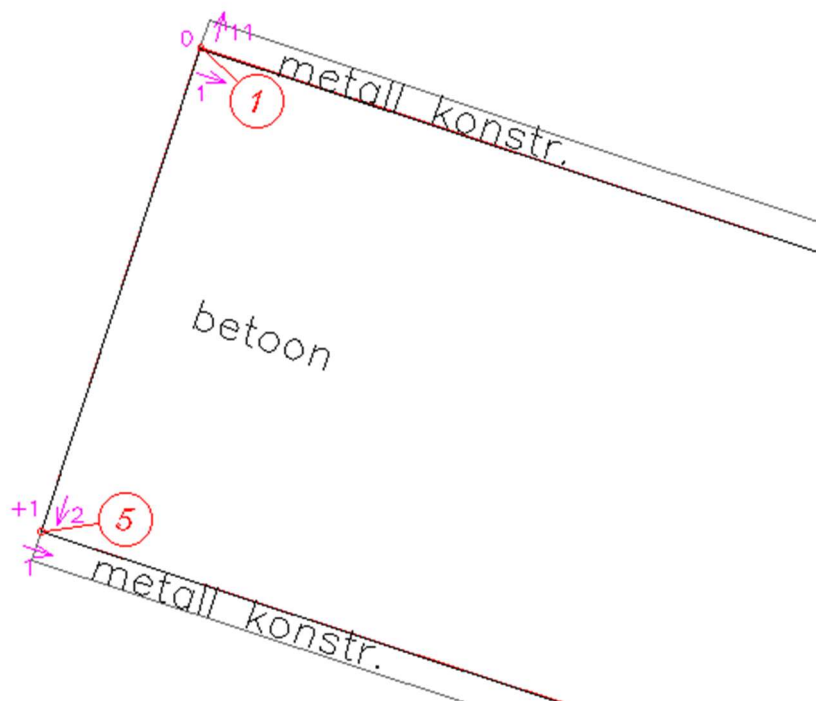


Joonis 4.1. Silla vundamendi kõrguste omavahelise suhte võrdlemine

Koordinaatide võrdlusest selgub, et varasema või siis praeguse mõõdistusega on tekkinud punkti 6 (betooninurk) asukohavalikus viga. Järeldatakse seda sellepärast, et nurgapunktides 3, 4 ja 7 on hälve samas suunas 6–7 mm, aga punktis 6 samas suunas 2 mm. Tegu on monoliitse betoonrajatisega. Sellisel juhul peaks liikumine igas ühel joonel asuvas nurgas olema sama suur. (joonis 3.1). Betoonrajatise vastas nurkade hälve punktis 8 on 5 mm ja punktis 2 4 mm. (joonis 3.1). Koordinaadi suhtes on raskem teha järeldust, sest betooninurga määramisel võib juba teha ± 5 mm vea. Kui seda arvestada, siis saab järeldada, et betoonrajatise liikumist pole toimunud või siis on liikumine minimaalne ning ei põhjusta sillale kahjustusi.

Varasema mõõdistusega võrreldes leiti üks huvitav hälve. Nurgapunktid 1 ja 5 on geodeedile üheselt tuvastatavad ca ± 3 mm asukoha veaga. Tegu on metallkarkassi nurgaga, mis on betooni täis valatud ja monoliitseks muudetud. Karkass toetub silla vundamendile ning ei liigu (ei ole rippuv silla osa) ei plaaniliselt ega kõrguslikult. Punktis 5 on kõrguslik hälve varasemaga võrreldes + 1 mm ja plaaniline hälve ühes suunas 2 mm ja teises 1 mm. Sellest võib järeldada, et nurk pole ajas muutunud. Küll on punktis 1 toimunud muutus. Seal pole

kõrguslikku erinevust varasemaga, kuid plaaniliselt on ühes suunas erinevus 1 mm ja teises suunas 11 mm. Seda on juba natuke palju, sest nurga asukoha määramisel võib teha maksimaalselt ± 3 mm vea. Kuna hälve on väljaspool silda, siis võib olla juhtunud, et metall on järele andnud ning on tekkinud nihe. (joonis 4.2).



Joonis 4.2. Metallkonstruktsiooni nurkade hälbed

Teise telje betoonrajatise koordinaatide erinevused võrreldes varasema mõõdistusega jäävad ± 5 mm piirisse (tabel 3.4). Kõige suurem hälve oli punktis 16 ($\Delta X = 5$ mm, $\Delta Y = 5$ mm, $\Delta H = 1$ mm) ja kõige väiksem punktis 15 ($\Delta X = 2$ mm, $\Delta Y = 3$ mm, $\Delta H = 0$ mm). (joonis 3.5). Plaanilist joonist vaadates on hälbed suuremad punktis 16 ja väiksemad punktis 15. Nendest võib järeldada, et varasema mõõdistuse ja praeguse tööga on tabatud hästi nurgapunktide asukohta. Hälbed jäävad piiridesse, mille põhjal saab väita, et rajatis pole vajunud ega liikunud.

Rippuva osa mõõtmistulemustest on selgesti näha, et lisaraskus sillal mõjutab kõrguslikku hälvet märgatavalt. Kui muidu on autori raskuse all silla kõrguslik keskmine erinevus varasemaga -7 mm, siis lisaraskusega oli see poole rohkem. Suurim erinevus oli punktis 22, kus kõrgusvahe oli -21 mm. Edasi mõõtes läks kõrguste erinevus varasema mõõdistusega võrreldes stabiilsemaks.

KOKKUVÕTE

Rajatise deformatsioone saab uurida ka siis, kui sellele pole kinnitatud spetsiaalseid vajumisreepereid. Tuleb teada, kuidas on varasemad andmed saadud ning milliseid mõõdistusmeetodeid kasutatud. Vastavalt sellele saab arvestada mõõdistuse erinevustest tingitud vigu. Kuna töö autor tegi ise varasema silla teostuse, oskati ka hinnata põhjuseid, miks mõnes kohas võis viga olla suurem ning mõnes väiksem. Õnneks olid varasemad mõõdistuspunktid, mille pealt sai kogu sild märgitud ja teostatud, alles. Seega ei pidanud rajama uut mõõdistuskäiku ning välistatud olid käigust tekkivad erinevused.

Enne mõõdistustöid tuli kontrollida ka üle treeger, et vältida sellest tingitud tsentreerimise vigu. Kuna varasemad andmed olid mõõdetud kahemehe tahhümeetriga ja praegused robottahhümeetriga, siis tuli arvestada suunamisest tekkinud vigadega. Betoonrajatise nurkade täpse asukoha valikuga olid ka väikesed probleemid. Mõned nurgad olid aja jooksul natukene kannatada saanud ja varasemat täpset kohta, millele oli mõõdetud koordinaat, oli raske tuvastada. Seega tuli lõpptulemusi analüüsides arvestada ka nurkade asukohavalikust tingitud vigadega. Kui arvestada prismale suunamisest, nurkade asukohavalikust tekkivaid vigu, siis võis arvestada, et kui tulemused jäävad ± 7 mm ulatusse, pole rajatisega suuri deformatsioone toimunud.

Mõõtmistulemustest selgus, et esimese telje betoonrajatis oli mõne millimeetri võrra vajunud, kuid plaanilist nihkumist mõõdistusega välja ei tulnud, sest betooninurki ei saa nii täpselt määrata. Iga järgnev määramine põhjustab erinevat tulemust. Teise telje betoonrajatis polnud üldse ajas nihkunud või vajunud. Küll aga leiti plaanilise erinevuse silla raudkarkassi nurgas, mis oli 11 mm nihkunud. Kuna karkassi nurka oli võimalik täpselt tuvastada ja koordineerida, siis võib järeldada, et karkassi nurk on nihkunud. Kogu rajatise kohta saab öelda, et sild on töokorras ja nelja aastaga pole olulisi muudatusi konstruktsioonis toimunud. Seda tõestab ka see, et betoonrajatistes puudusid mõrad.

Sildade ehitamisel peaks olema kohustuslik vajumisreepereite paigaldamine. Siis on võimalik mõõta kordades täpsemalt koordinaate. Kui aastaid tagasi tehti silla teostusmõõdistus, ei osanud sellele mõeldagi, et võiks mõõta olulised nurgad sisse täisvõtetega, et hiljem saaks kontrollimisel täpsema tulemuse ja kindlamad järeldused silla deformatsiooni osas teha. Edaspidi on soovitatav ehitajal vajumisreepereid paigaldada, mis tagavad vajadusel rajatise deformatsioonide parima jälgimise.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. „Survey Controller Manual“ [Võrgumaterjal].
https://www.ngs.noaa.gov/corbin/class_description/controllerv10UserGuide.pdf
2. **Harli Jürgenson.** (2014). „Elektrontahhümeetria“ konspekt.
3. **E. Ilves.** „Elektrontahhümeetrid,“ 2011. [Võrgumaterjal].
http://e-ope.ee/_download/euni_repository/file/1620/maam.zip/13%20loeng.pdf
4. **Beshr, A, A, E, W., Kaloop, M, R.** 2013. Monitoring bridge deformation Using Auto-Correlation Adjustment Technique for Total Station Observations. Published Online February (<http://www.scirp.org/journal/pos>).
5. **Liptak, I.** 2013. Monitoring the dynamic deformation of the bridge structures by accelerometers. Reports on Geodesy vol. 94, 37–46.
6. **Handayani, H. H., Yuwono, Taufik. M.** 2015. Preliminary study of Bridge Deformation monitoring using GPS and CRP (case study: Suramadu Bridge). Procedia Environmental Sciences 24, 266–27.
7. **Cosser, E., Roberts, G, W., Meng, X., Hodson, A, H.** 2003. Measuring the dynamic deformation of bridges using a total station. Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece.
8. **Liptak, M.** 2011. Analysis of Bridge Structure Deformation Measured by Total Station. Slovak University of Tehnology in Bratislava.
9. **Van Dosselaer, J., Van Hooreweghe, J., Van Londersele, B.** 2012. Deformation Measurement with Trimble’s S8 Total Station and Other Sensors. FIG Young Surveyors Conference – Workshop 1.3, 6235 Belgium.

LISAD

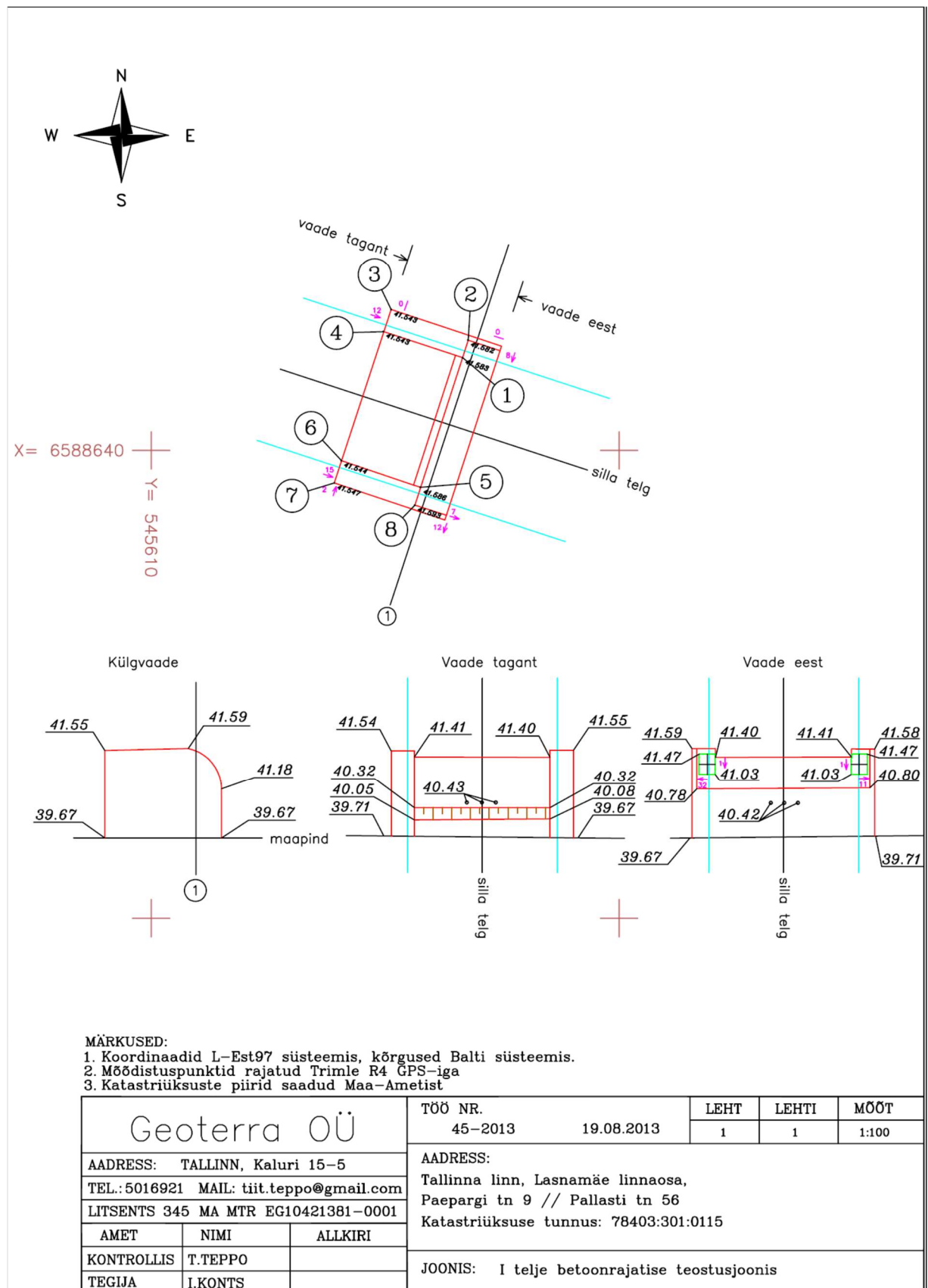
Lisa 1. Trimble 5605 DR 200+ spetsifikatsioonid

ACCURACY	5601 DR200+	5602 DR200+	5603 DR200+	5605 DR200+
<i>Distance Measurement (with or without reflector)</i>				
Accuracy SDV				
5 - 200 m (16,4 ft - 656 ft)	±(3 mm + 3 ppm) ±(0.01 ft + 3 ppm)	±(3 mm + 3 ppm) ±(0.01 ft + 3 ppm)	±(3 mm + 3 ppm) ±(0.01 ft + 3 ppm)	±(3 mm + 3 ppm) ±(0.01 ft + 3 ppm)
beyond 200 m (656 ft) (without reflector)	±(5 mm + 3 ppm) ±(0.016 ft + 3 ppm)	±(5 mm + 3 ppm) ±(0.016 ft + 3 ppm)	±(5 mm + 3 ppm) ±(0.016 ft + 3 ppm)	±(5 mm + 3 ppm) ±(0.016 ft + 3 ppm)
Shortest possible range:	2 m (6.5 ft)	2 m (6.5 ft)	2 m (6.5 ft)	2 m (6.5 ft)
Least count				
Arithmetic mean value (D-bar):	0.1 mm (0.0005 ft)	1 mm (0.005 ft)	1 mm (0.005 ft)	1 mm (0.005 ft)
Standard measurement (STD):	1 mm (0.005 ft)	1 mm (0.005 ft)	1 mm (0.005 ft)	1 mm (0.005 ft)
Fast standard (FSTD):	1 mm (0.005 ft)	1 mm (0.005 ft)	1 mm (0.005 ft)	1 mm (0.005 ft)
Tracking (TRK):	10 mm (0.01 ft)	10 mm (0.01 ft)	10 mm (0.01 ft)	10 mm (0.01 ft)
Measuring time (with reflector)				
Arithmetic mean value (D-bar):	Users decision	Users decision	Users decision	Users decision
Standard measurement (STD):	2 sec.	2 sec.	2 sec.	2 sec.
Fast standard (FSTD):	2 sec.	2 sec.	2 sec.	2 sec.
Tracking (TRK):	0.4 sec.	0.4 sec.	0.4 sec.	0.4 sec.
Measuring time (without reflector)				
Arithmetic mean value (D-bar):	Users decision	Users decision	Users decision	Users decision
Standard measurement (STD):	2-10 sec.	2-10 sec.	2-10 sec.	2-10 sec.
Fast standard (FSTD):	2-10 sec.	2-10 sec.	2-10 sec.	2-10 sec.
Tracking (TRK):	0.4 sec.	0.4 sec.	0.4 sec.	0.4 sec.
Light source:	IR Laser Diode 850 nm	IR Laser Diode 850 nm	IR Laser Diode 850 nm	IR Laser Diode 850 nm
Beam divergence				
Horizontal:	0.4 mrad (4 cm/100 m) (0.13 ft/328 ft)	0.4 mrad (4 cm/100 m) (0.13 ft/328 ft)	0.4 mrad (4 cm/100 m) (0.13 ft/328 ft)	0.4 mrad (4 cm/100 m) (0.13 ft/328 ft)
Vertical:	0.8 mrad (8 cm/100 m) (0.26 ft/328 ft)	0.8 mrad (8 cm/100 m) (0.26 ft/328 ft)	0.8 mrad (8 cm/100 m) (0.26 ft/328 ft)	0.8 mrad (8 cm/100 m) (0.26 ft/328 ft)
Atmospheric correction:	-60 to 195 ppm continuously	-60 to 195 ppm continuously	-60 to 195 ppm continuously	-60 to 195 ppm continuously

ACCURACY	5601 5601 DR200+	5602 5602 DR200+	5603 5603 DR200+	5605 5605 DR200+
<i>Angle Measurement</i>				
Accuracy (Standard deviation based on DIN 18723)	1" (0.3 mgon)	2" (0.5 mgon)	3" (1.0 mgon)	5" (1.5 mgon)
Angle reading (least count)				
Number of decimals can be specified by the user				
Arithmetic mean value (D-bar):	0.1" (0.01 mgon) (horizontal angle)	1" (0.1 mgon)	1" (0.1 mgon)	1" (0.1 mgon)
Standard measurement:				
Fast tracking:	1" (0.1 mgon) 2" (0.5 mgon)	1" (0.1 mgon) 2" (0.5 mgon)	1" (0.1 mgon) 2" (0.5 mgon)	1" (0.1 mgon) 2" (0.5 mgon)
Automatic level compensator				
Dual-axis compensator with a working range of:	6' (±100 mgon)	6' (±100 mgon)	6' (±100 mgon)	6' (±100 mgon)

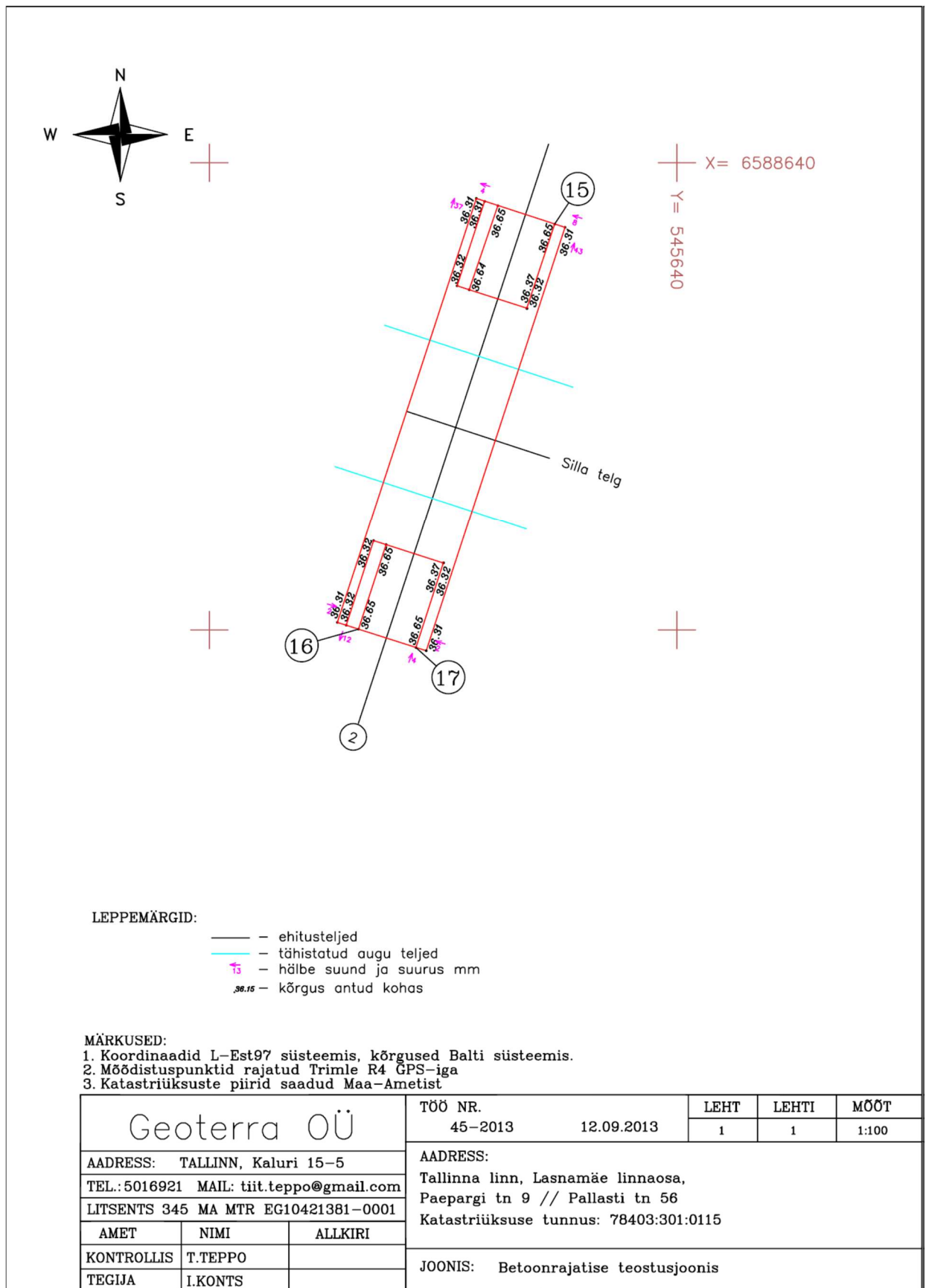
Joonis 1. Trimble 5605 DR 200+ näitajad

Lisa 2. Esimese telje betoonrajatise teostusjoonis



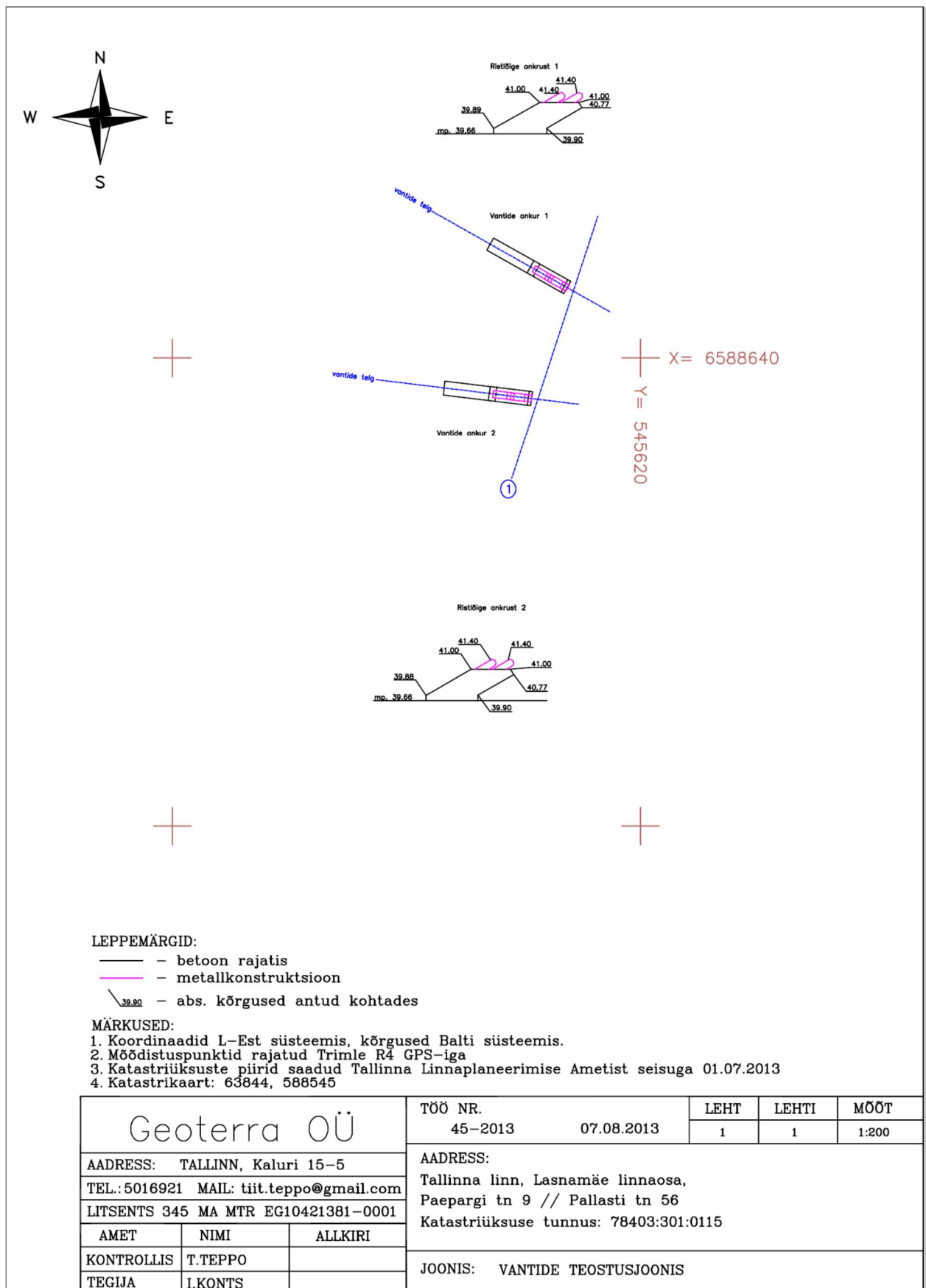
Joonis 2. Esimese telje betoonrajatise teostusjoonis

Lisa 3. Teise telje betoonrajatise teostusjoonis



Joonis 3. Teise telje betoonrajatise teostusjoonis

Lisa 4. Vantide teostusjoonis



Joonis 4. Vantide teostusjoonis

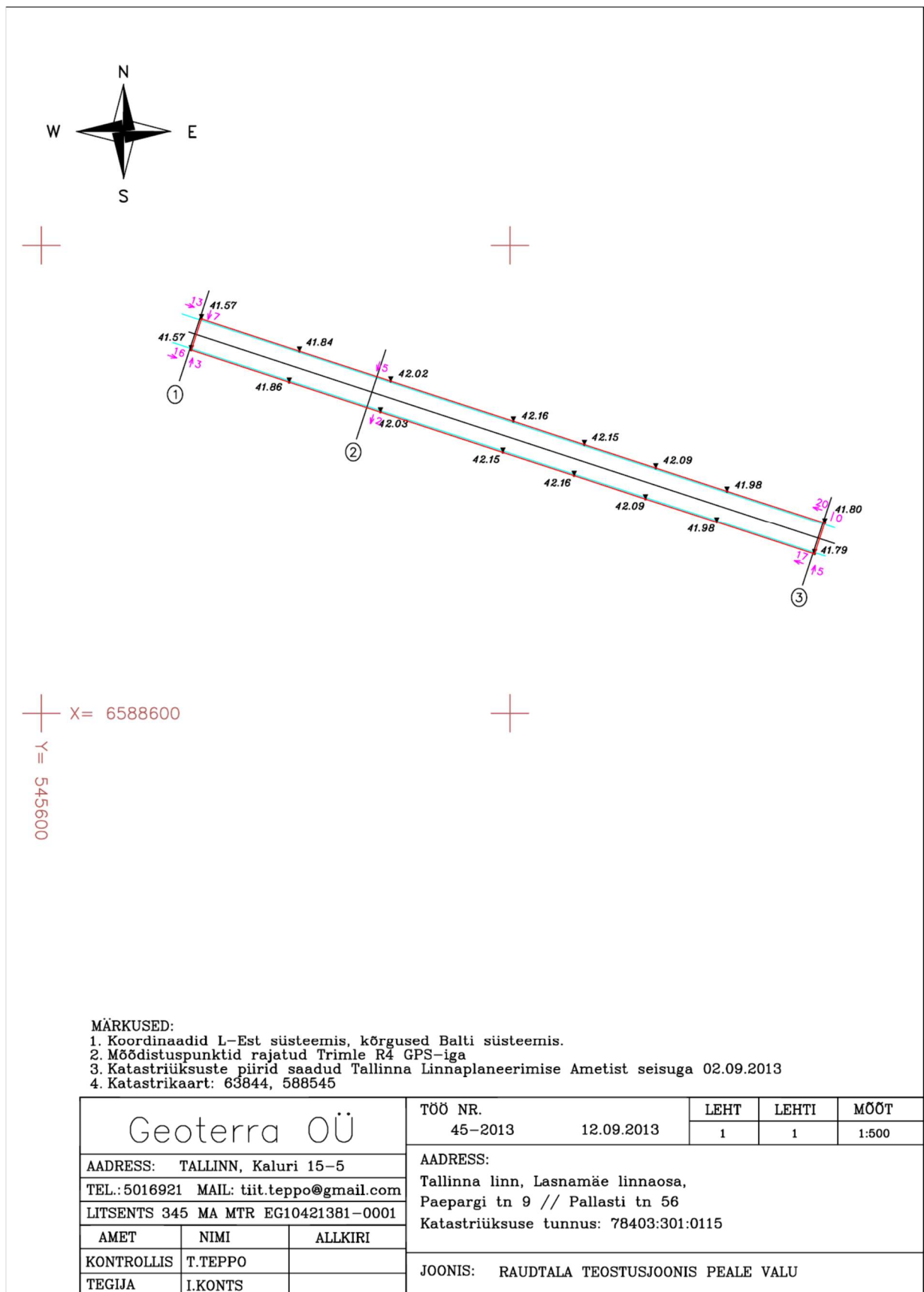
Lisa 5. Vaba jaamaga tahhümeetri orienteerimise raport

Instrument		Trimble 5600	
Instrument type		274.4	
EDM Refractive Index		79.4	
EDM Carrier Wavelength		Set to azimuth	
Horizontal Circle Mode		0.00062	
Horizontal Angle Precision		0.00062	
Vertical Angle Precision		2mm +2ppm	
EDM precision			
Atmosphere			
Pressure	764.3mmHg	Temperature	18.0°C
Curvature correction	Yes	Refraction correction	Yes
Station setup		18.0°C ppm	
Station	2000	Instrument height	0.000
Orientation		Station type	0.000000
Station	2000	Backsight point	G3
Point		Orientation correction	0.000000
Point (B.S.)	G3 X		0.000000
Std Errors	G3 HA		545599.754 Z
Target height	HA		113.80113 SD
	0.140 Prism constant		0.00154 SD
	0.0mm		0.003
Point	G2 X		545567.995 Z
Point (B.S.)	G2 HA		9714013 SD
Std Errors	HA		0.00154 SD
Target height	0.140 Prism constant		0.003
	0.0mm		
Point	2000 X		545610.071 Z
Resection	2000	Std Error (°)	0.000
		Std Error (E)	0.000
		Std Error (E)	0.007

Joonis 5. Vaba jaamaga

orienteerimise raport

Lisa 6. Silla rippuva osa teostusjoonis



Joonis 6. Rippuva osa teostusjoonis

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks
ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Ingo Konts,

(sünnipäev 06/06/1984)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö
Paepargi ripp silla deformatsioonide mõõtmine,

mille juhendaja on Tarmo Kall,

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

- 2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
- 3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartu, 21.05.2018

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)